

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**GENERACIÓN DE UN MODELO DE REGRESIÓN SEGMENTADO A  
TRAVÉS DE UN ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO EN *Pseudotsuga  
menziesii* (MIRB.) FRANCO**

**POR**

**ING. EDGAR JESUS ORTEGA ARROYO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**NOVIEMBRE, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**GENERACIÓN DE UN MODELO DE REGRESIÓN SEGMENTADO A  
TRAVÉS DE UN ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO EN *Pseudotsuga  
menziesii* (MIRB.) FRANCO**

**POR**

**ING. EDGAR JESUS ORTEGA ARROYO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**NOVIEMBRE, 2017**

**GENERACIÓN DE UN MODELO DE REGRESIÓN SEGMENTADO A TRAVÉS  
DE UN ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO EN *Pseudotsuga menziesii* (MIRB.)  
FRANCO.**

Aprobación de Tesis



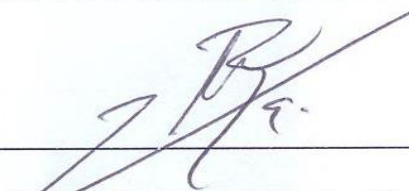
---

Director: Dr. Javier Jiménez Pérez



---

Co-director: Dr. Israel Yerena Yamalle



---

Asesor: Dr. Eduardo Alanís Rodríguez



---

Asesor: Dr. Francisco Cruz Cobos



---

Asesor: Dr. Juan Gabriel Álvarez González

**Noviembre, 2017**

## DECLARATORIA

Declaro que la presente investigación es original y se desarrolló para obtener el título de Maestría en Ciencias Forestales. Donde se utilizó información de otros autores a los cuales se les otorga los créditos correspondientes.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'E. Ortega Arroyo', written in a cursive style.

---

Ing. Edgar Jesus Ortega Arroyo

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el aporte económico brindado para la realización de mis estudios de Maestría.

A la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por aceptarme como estudiante del Programa de Posgrado.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en especial al Dr. José Villanueva Díaz, por abrirme las puertas de su laboratorio de Dendrocronología y por sus consejos para la realización de este trabajo.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez, por aceptarme para formar parte de su equipo de trabajo, dirigir este trabajo de tesis, por su apoyo profesional, académico y por sus valiosos consejos en el trayecto de mi formación académica.

Al Dr. Israel Yerena Yamallel, por aceptar formar parte del Comité de tesis; por el conocimiento aportado y por su amistad.

Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez por aceptar formar parte del comité de tesis y por sus consejos.

Al Dr. Francisco Cruz Cobos, del Instituto Tecnológico de El Salto (ITES), por aceptar formar parte de mi comité de tesis y por su tan valiosa amistad, y el apoyo para el trabajo en campo.

Y muy en especial al Dr. Juan Gabriel Álvarez González, de la Universidad de Santiago de Compostela, España, Por aceptar ser mi asesor y mi tutor durante mi estancia y por darme muy buenos consejos para la realización de la tesis.

A los catedráticos de la Facultad de Ciencias Forestales por el conocimiento transmitido tanto teórico como practico.

## DEDICATORIA

**A Dios:** porque sin ti nada de esto sería posible, por poner los medios para el cumplimiento de esta meta, por amarme y cuidarme. **GRACIAS DIOS**

A mi Madre: **Carmen Carolina Arroyo Mercado**, por su apoyo incondicional, por su amistad, por ser padre y madre para mí, por estar ahí a cada paso que doy, en este camino que se llama vida, te amo mucho “Lina”, Dios la bendiga siempre.

A mi Padre: **Manuel de Jesús Ortega González**, por enseñarme que la vida no es fácil y que jamás hay que darse por vencido ante nada ni nadie, por su amistad y por apoyarme en todo momento, te amo “mi viejo”.

A mis hermanos: **Julio y Karen**, por estar ahí para mí de una u otra manera, por las horas compartidas de bromas y por decirme cosas hermosas para seguir echándole muchas ganas a mis estudios.

A mi **tío Julián**: Por sus valiosos consejos y por su amistad, por estar ahí cuando lo necesito y por quererme y apoyarme como lo hace.

A mis sobrinos: **Darién, Sebastián, Isabela, Emiliano, Ximena y Jorgito**, por inyectarme alegría y por guardarme en un cachito de su corazón.

A la familia Acevedo Benítez: en especial a la **señora Mary** y el **señor Abundio**, sin duda parte fundamental de mi familia, por el apoyo otorgado y sus pláticas que tenemos respecto a la vida.

A ti: **Fátima del Carmen Acevedo Benítez** (Mi pedacito de cielo), mi eterna compañera, mi amiga incondicional, mi novia, mi motor, gracias por aceptar acompañarme en todo, por estar ahí a cada momento, por amarme como lo haces, una meta más amor y las que nos faltan mi cielo, te amo mocosa!!

A mis amigos: **Edgar, Anali, Dany, René, Richy, Rigo, Angie Dr. Marco, Dr. Fortunato, Dr. Humberto, Dra. Laura Scott** por todos los consejos y ánimos, por su valiosa amistad, parte fundamental para continuar adelante. **Gracias**



## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	2
2.1. Calentamiento global y su influencia con la variabilidad climática .....	2
2.2. Escenarios del calentamiento global y su relación con eventos climáticos a nivel mundial.....	2
2.3 Utilización de series de tiempo y modelos de predicción.....	3
2.4 Modelos de regresión segmentada.....	3
3. JUSTIFICACIÓN .....	5
4. HIPÓTESIS .....	6
5. OBJETIVOS .....	7
5.1 Objetivo General.....	7
5.1.1. Objetivos Específicos .....	7
6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	8
6.1 Análisis Dendroclimático.....	8
6.1.1. Áreas de estudio .....	8
6.1.2. Trabajo de campo.....	9
6.1.3. Trabajo de laboratorio .....	12
6.1.4. Fechado y medición .....	13
6.1.5. Control de calidad de fechado .....	15
6.1.6. Estandarización de los datos.....	16
6.1.7. Obtención de registros de precipitación y temperatura .....	17
6.1.8. Correlación clima-crecimiento .....	17
6.1.9 Reconstrucción climática.....	18
6.2. Elaboración del Modelo de Regresión .....	19
6.2.1. Correlación de las cronologías para El Norte -Noreste de México ...	19
6.2.2. Series del tiempo y Modelos ARIMA .....	19
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22



**GENERACIÓN DE UN MODELO DE REGRESIÓN SEGMENTADO A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS  
DENDROCLIMÁTICO EN *Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO.**



7.1	Obtención de Cronologías .....	22
7.2	Relación Clima-Crecimiento .....	24
7.3	Reconstrucción del clima. ....	25
7.4	Reconstrucción del periodo total y detección de periodos secos y húmedos.....	27
7.5	Correlación entre cronologías.....	30
7.6.	Aplicación del Modelo ARIMA .....	32
7.7	Modelo de Regresión segmentado .....	36
8	CONCLUSIONES.....	38
9	BIBLIOGRAFÍA .....	39





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de las cronologías regionales generadas por el programa ARSTAN para el Norte-Noreste de México. ....	23
Tabla 2. Modelos Lineales generados, para cada zona. ....	27
Tabla 3. Modelos generados por el método Auto-Arima. ....	34
Tabla 4. Estadísticos de la regresión. ....	34
Tabla 5. Análisis de varianza. ....	35
Tabla 6. Coeficientes del modelo lineal y del modelo Arima. ....	36



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Area de Estudio .....	9
Figura 2. Árbol con las características para el muestreo .....	10
Figura 3. Uso de la barrena para la obtención de las virutas. ....	11
Figura 4. Virutas guardadas en popotes para su posterior análisis. ....	12
Figura 5. Muestra preparada bajo técnicas dendrocronológicas.....	13
Figura 6. Conteo preliminar de los anillos.....	14
Figura 7. Medición en el sistema de medición Velmex. ....	14
Figura 8. Cronologías generadas por ARSTAN.....	16
Figura 9. Correlación entre el índice de ancho de anillo de y la precipitación acumulada mensual para el Norte-Noreste de México) .....	24
Figura 10 .correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos, Cerro El Potosí .....	25
Figura 11. Correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos Sierra de Zapalinamé. ....	26
Figura 12. Correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos, Puente de las Américas. ....	26
Figura 13. Reconstrucción total para el Cerro El Potosí 1888-2015. ....	27
Figura 14. Reconstrucción de la precipitación Puente de las Américas, 1880-2014. ....	28
Figura 15. Reconstrucción de la precipitación Sierra de Zapalinamé, 1889-2015. .....	29
Figura 16. Correlación entre cronologías.....	30
Figura 17. Cronología general para el Norte-Noreste de México.....	31
Figura 18. Correlación ENOS-PDO-Cronología general.....	32
Figura 19. Tendencia de la cronología general 1950-2014.....	32
Figura 20. Autocorrelación (AC) y Autocorrelación Parcial (PAC) del modelo..	33
Figura 21. Gráfica generada donde se observa la tendencia positiva de la predicción de los valores futuros.....	35
Figura 22. Gráfica donde se observa la tendencia del modelo con respecto al valor real y al pronosticado. ....	37



## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es Generar un modelo de Regresión Segmentado a través de un análisis dendroclimático en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, para ello se desarrollaron tres cronologías en tres bosques de coníferas, en el Norte-Noreste de México, se correlacionó el Índice de ancho de anillo con las variables climáticas de precipitación y temperatura con las estaciones más cercanas al sitio. Las cronologías desarrolladas para cada una de las zonas comprenden periodos de edad que van desde los 127 años hasta 135 años, el periodo de edad más largo (135 años) corresponde a la cronología de Puentecillas. Las correlaciones internas de las tres cronologías fueron positivas, para CPOT se obtuvo un valor de .72, para el área de SZAP se obtuvo una intercorrelación de .70, para la zona de PNT, se obtuvo una intercorrelación entre series de .567. En las áreas de estudio se determinó que el periodo de lluvia que influye de manera significativa ( $p < 0.05$ ) en el crecimiento de la especie, es el periodo invierno-primavera de enero a mayo específicamente.

La relación entre el índice de ancho de anillo y la precipitación acumulada (enero -mayo) presentó una asociación positiva en las tres áreas, en SZAP se obtuvo una correlación de 0.65, para CPOT 0.79, y por último para PNT se obtuvo una correlación de 0.69.

La correlación entre las cronologías más alta se logró a partir del año 1950 a 2014, que fue en el periodo donde se encontraron correlaciones positivas que variaron de 0.51 a 0.74.

El modelo que mejor se ajustó a los datos fue el ARIMA (0,2,2), donde el valor de  $F(124.95 > P = .05)$  fue significativa, los coeficientes del modelo fueron  $B_0 = 0.0004$ ,  $B_1 = -1.6551$  y  $B_2 = 0.6898$ , con un coeficiente de correlación de .89.

**PALABRAS CLAVE:** Anillos de crecimiento, ARIMA, cronologías, Norte-Noreste



## SUMMARY

The aim of this work is generate a regression model segmented through a dendroclimatic analysis in *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, in three coniferous forests, In the North-Northeast of México, the Ring-width index was correlated with the climatic variables of precipitation and temperature with the stations closest to the site.

The chronologies developed for each of the zones include periods ranging from 127 years to 135 years, the longest period (135 years) corresponds to the chronology of Puenteillas. The internal correlations of the three chronologies were positive, for CPOT a value of .72 was obtained, for the area of SZAP an intercorrelation of .70 was obtained, for the area of PNT, an intercorrelation between series of .567 was obtained. In the study areas it was determined that the period of rain that significantly influences ( $p < 0.05$ ) in the growth of the species, is the winter-spring period from January to May specifically. The relationship between ring width index and accumulated precipitation (January-May) showed a positive association in the three areas, in SZAP a correlation of 0.65 was obtained for CPOT 0.79 and finally for PNT a correlation of 0.69.

The correlation between the highest chronologies was obtained from 1950 to 2014, which was in the period where positive correlations were found that ranged from 0.51 to 0.74.

The model best fittest the data was the ARIMA (0,2,2), where the value of F ( $124.95 > P = .05$ ) was significant, the coefficients of the model were  $B_0 = 0.0004$ ,  $B_1 = -1.6551$  and  $B_2 = 0.6898$  with a correlation coefficient of .89.

**KEY WORDS:** Growth rings, ARIMA, chronologies, North-Northeast.



## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del clima del pasado es fundamental para determinar su variabilidad en el tiempo, tendencias y posible comportamiento futuro. Los datos procedentes de registros de estaciones climatológicas presentan una desventaja en su uso, dicha desventaja es su corta extensión, ya que muchas de las estaciones climatológicas son de a principios de 1920, además que presentan falta de calidad y de representatividad. El incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en las últimas décadas ha producido cambios en los patrones de precipitación asociados al calentamiento global, y de igual manera ha generado un incremento en la temperatura, y las proyecciones a futuro indican que la temperatura continuara aumentando.

Para entender el comportamiento del clima en el pasado y poder realizar extrapolaciones a futuro, se han desarrollado diferentes metodologías, una de ellas es la dendrocronología, a través de esta se puede realizar la reconstrucción de eventos y parámetros climáticos tales como: precipitación, temperatura, sequías y periodos lluviosos del pasado, todo esto con base en el crecimiento del anillo.

Entre otras metodologías se encuentran los modelos basados en series de tiempo, los cuales son utilizados para realizar predicciones con base en el comportamiento de las variables a través del tiempo, entre estos modelos se encuentran los autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA por sus siglas en inglés).

En el presente estudio, se generó una cronología general basada en tres cronologías de los estados de Durango, Coahuila y Nuevo León, y se utilizaron modelos ARIMA, para realizar predicciones con el fin de conocer el comportamiento del crecimiento de la especie a futuro.



## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Calentamiento global y su influencia con la variabilidad climática

El estudio del calentamiento global atribuido a causas antropogénicas también requiere del conocimiento de la variabilidad hidroclimática pasada, con el fin de entender las posibles causas de estos cambios y el grado de afectación local, regional y nacional en el ámbito social, económico e impacto en la estabilidad de los ecosistemas, de tal suerte que sea factible diseñar estrategias de prevención y principalmente adaptación ante estos cambios que año con año son más frecuentes (Villanueva *et al.*, 2008).

El clima depende de varios factores que interactúan entre sí de forma muy compleja entre el mar y los continentes a diversas escalas, por lo que, el estudio de las oscilaciones atmosféricas o teleconexiones que impactan grandes y apartadas regiones del planeta Tierra, son de gran ayuda para entender a nivel espacial y temporal el comportamiento del clima a nivel regional (Ruiz, 2008 ; Constante-García, 2015).

### 2.2. Escenarios del calentamiento global y su relación con eventos climáticos a nivel mundial

Constante-García, 2015 menciona que las principales teleconexiones que influyen en el régimen de lluvias en México, son El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés), cuya intensidad y también expresión varían de una región a otra, por lo que la influencia de ambos se vuelve de particular interés, dado que estudios anteriores, indican que eventos extremos de gran magnitud como el del año 1998, podrían ocurrir, si ambos fenómenos coinciden o si se da la interacción entre ambas, ya que de esta manera puede que sean la posible causa de sequías prolongadas.



Escenarios futuros proyectan que para las próximas dos décadas el calentamiento puede ser de aproximadamente  $0.2^{\circ}\text{C}$  por década, para un rango de escenarios de emisiones, y que para el año 2100 la temperatura puede incrementarse entre  $1.8$  a  $4.0^{\circ}\text{C}$  por encima del promedio de 1980-1999 (Dolgova, 2016).

### **2.3 Utilización de series de tiempo y modelos de predicción.**

Los modelos basados en series de tiempo son una de las metodologías más ampliamente utilizadas para realizar predicciones en distintas ramas de investigación como son en la economía, hidrología, ciencias agropecuarias, ecología y climatología principalmente para conocer el comportamiento de las variables a través del tiempo entre estos modelos se encuentran los autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA por sus siglas en inglés), que permiten representar de forma simple muchos fenómenos reales al ajustar una función apropiada a las observaciones pasadas de un proceso y posteriormente, realizar una extrapolación, pues muchos de los fenómenos temporales se pueden describir con base a sus dos componentes fundamentales, la tendencia y la estacionalidad (Pajuelo & Lorenzo, 1995).

### **2.4 Modelos de regresión segmentada**

Muggeo, (2003) menciona que la regresión segmentada o regresión por pedazos es un método en el análisis de regresión en que la variable independiente es fragmentada en intervalos ajustando en cada intervalo una línea o curva a los datos. La regresión segmentada se puede aplicar también a la regresión con múltiples variables.



La regresión segmentada es útil cuando la variable dependiente muestra una reacción abruptamente diferente a la variable independiente en los diferentes segmentos. En este caso el límite entre los segmentos se llama “punto de quiebra”.

Si bien los modelos de regresión lineal establecen como hipótesis que la relación entre las variables explicativas y la respuesta se puede expresar en términos de una función lineal en las variables dependientes. La ecuación de regresión del modelo se podría escribir como:

$$Y = \alpha_1 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Las principales ventajas de este modelo son su sencillez (en el sentido de que intervienen pocos parámetros) y fácil interpretación. Con esta notación,  $\alpha_1$  representaría el valor de la variable respuesta predicho por el modelo cuando  $X = 0$  y  $\beta_1$  mediría el aumento en la variable  $Y$  al incrementar  $X$  una unidad. A partir de aquí,  $\alpha_1$  recibirá el nombre de intercepto y  $\beta_1$  el de pendiente, pues se está modelizando la relación mediante una recta. Sin embargo, los modelos de regresión lineal asumen que el ritmo al que crece  $Y$  al aumentar  $X$  es el mismo independientemente del valor que tenga  $X$ .

De igual manera el uso de los modelos lineales son la base para la generación de modelos de regresión segmentada, una primera solución pasara entonces por suponer que existe un punto  $\psi \in \mathbb{R}$  (punto de cambio o de quiebre), tal que la relación de  $X$  e  $Y$  es lineal antes y después de  $\psi$  pero con diferentes pendientes. De ahora en adelante, el valor  $\psi$  será denominado “punto de cambio”. De este modo, adaptando la notación usada por Muggeo (2003), la ecuación antes mencionada se reescribiría como:

$$Y = \alpha_1 + \beta_1 X + \beta_2 (X - \psi)_+ + \varepsilon$$

Donde  $(X - \psi)_+ = (X - \psi)I(X > \psi)$ , siendo  $I(\cdot)$  la función indicadora. Con esta notación,  $\beta_1$  es la pendiente del modelo cuando  $X \leq \psi$  y  $\beta_1 + \beta_2$  es la pendiente





cuando  $X > \psi$ . Equivalentemente,  $\beta\psi$  puede ser interpretado como la diferencia entre la primera y la segunda pendiente del modelo.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Los parámetros del clima y eventos climáticos ocurridos en el pasado son difíciles de conocer por medio de los registros de las estaciones meteorológicas debido a que no existen registros del clima mayores de 100 o 200 años estudios dendrocronológicos en el Norte del país, indican que las precipitaciones de invierno-primavera se encuentran influenciadas por el ENOS, dicho evento genera sequias que se presentan cada 50 o 100 años.

La presente investigación se realizó en estados pertenecientes a la parte norte y noreste del territorio nacional, donde el agua es un recurso indispensable, social y ecológicamente hablando donde el llevar una adecuada planeación de los recursos hídricos a futuro se vuelve fundamental.

Parte fundamental de la investigación se basa en la realización de predicciones a futuro ajustado a eventos pasados, de igual manera se aporta información relevante sobre el impacto del cambio climático en el Norte Noreste de México al generalizar la información, puesto que se reconstruye más de un siglo de precipitación con la información otorgada por los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* que si bien es una especie estudiada con anterioridad , esta es la primera vez que se extrapolan los resultados al futuro con el uso de modelos ARIMA, en donde se muestran tendencias climáticas y asociaciones de fenómenos atmosféricos.



## 4. HIPÓTESIS

Para la elaboración del trabajo de investigación se generaron dos hipótesis:

- 1). Dada la sensibilidad que presenta *Pseudotsuga menziesii* a la precipitación, es posible generalizar una cronología para el Norte Noreste de México.
- 2). El crecimiento radial de la especie en estudio puede ser explicado por el modelo de regresión segmentado con una proyección al futuro, haciendo inferencia en que el crecimiento está dado por las variables; temperatura y precipitación.



## 5. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo General

Generar un modelo de Regresión Segmentado a través de un análisis dendroclimático en los anillos de crecimiento en *Pseudotsuga menziesii*.

#### 5.1.1. Objetivos Específicos

- ◆ Reconstrucción de la precipitación, en las tres zonas de estudio (Cerro El Potosí, Puente de las Uñas y Sierra de Zapalinamé).
- ◆ Determinación de las variaciones climáticas en el Norte y Noreste de México.
- ◆ Determinación del grado de correlación de las variables (precipitación y temperatura) con el desarrollo radial de *Pseudotsuga menziesii*, para cada área de estudio.
- ◆ Determinar la influencia de los fenómenos atmosféricos como El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico sobre los crecimientos del ancho de anillo de *Pseudotsuga menziesii*.
- ◆ Desarrollo metodológico de un sistema de evaluación de cambio climático. (Modelo de Regresión segmentado).



## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Análisis Dendroclimático

#### 6.1.1. Áreas de estudio

Las áreas de estudio corresponden al cerro El Potosí (CPOT), situado en el municipio de Galeana, al sur del estado de Nuevo León ( $24^{\circ} 50' 35''$  -  $24^{\circ} 53' 16''$  latitud norte;  $100^{\circ} 13' 12''$  -  $100^{\circ} 15' 12''$  longitud oeste). Fisiográficamente, el sitio pertenece a la Sierra Madre Oriental, a la sub provincia de la Gran Sierra Plegada con una precipitación media anual de 400 a 600 mm. Con una temperatura media anual que varía de 12 a  $18^{\circ}\text{C}$ , (Ávila Flores et al., 2014)., a Puenteillas (PNT), la cual se encuentra en la zona de Santa Bárbara y esta se ubica al sur del estado de Durango, en el municipio de Pueblo Nuevo, el sitio se localiza en los límites del ejido El Brillante, se localiza a los  $23^{\circ} 39'$  de latitud Norte y  $105^{\circ} 25'$  de longitud oeste, la zona se puede considerar como una de las áreas de mayor precipitación en el estado, oscila entre los 1 000 a 1 200 mm anuales.(Fig.1) Las temperaturas medias anuales registran  $11.5^{\circ}\text{C}$ , las extremas más frías registradas son de  $8.3^{\circ}\text{C}$  y las extremas más calurosas de  $14.3^{\circ}\text{C}$ , (García-Arévalo, 2008), así mismo la Sierra de Zapalinamé (SZAP) forma parte de los municipios de Saltillo y Arteaga y se ubica aledaña a la ciudad de Saltillo, entre los  $25^{\circ}15'00''$  -  $25^{\circ}25'58.35''$  latitud norte y los  $100^{\circ}47'14.5''$  -  $101^{\circ}05'3.8''$  longitud oeste., donde se registra una temperatura media anual de  $16.9^{\circ}\text{C}$  y la precipitación media anual de 498 mm, (Encina-Domínguez et al ., 2007).



Figura 1. Area de Estudio

### 6.1.2. Trabajo de campo

El muestreo se realizó de manera selectiva ubicando árboles con un diámetro  $\geq 20$  cm de diámetro a la altura del pecho ubicados de preferencia entre los 2,800 y 3,100 m.s.n.m., algunas de las condiciones para la selección fue que el árbol seleccionado tuviera forma lo mayor cilíndrica posible y que presentaran un aspecto longevo. Los datos dasométricos recabados fueron; diámetro normal, altura, diámetro de copa y exposición; asimismo datos generales como coordenadas, altitud y pendiente de cada uno de los sitios en las tres áreas de estudio (Fig. 2).



Figura 2. Árbol con las características para el muestreo

Se extrajeron tres virutas (núcleos de crecimiento) por árbol a la altura del pecho (1.30 m) con un taladro de Pressler marca Haglof Sweden, para extraer las muestras (viruta), la barrena se ubicó en el centro del árbol, presionando firmemente contra la corteza, colocada en ángulo recto (90°), perpendicular al tronco, y girando el mango en el sentido de las manecillas del reloj (Fig. 3).





Figura 3. Uso de la barrena para la obtención de las virutas.

Las muestras obtenidas fueron colocadas en popotes, debidamente etiquetados con la clave del sitio, datos dasométricos, numero de árbol muestra; el número de muestras tomadas se identificaron con letras (A, B, y C), orientación (N, S, E, O, NE, NO, SE, SO), la fecha de colecta y complementado con datos adicionales del árbol, como coordenadas, altura sobre el nivel mar, y de igual manera se anotó sí el árbol muestra contaba con señales de incendio o pudrición (Fig. 4)



Figura 4. Virutas guardadas en popotes para su posterior análisis.

### 6.1.3. Trabajo de laboratorio

Las muestras extraídas por árbol se prepararon mediante técnicas dendrocronológicas (Fig.5) tales como:

*Montaje y pegado sobre molduras de madera;* con las traqueidas en posición vertical esto se hace con la finalidad de facilitar la observación de los anillos de crecimiento.

*Pulido con lijas de grano fino;* para el área de Puenteillas las muestras se pulieron en la carpintería del INIFAP CENID-RASPA, hasta obtener una superficie en la que se apreciaran las estructuras celulares y de esta manera se pudiera diferenciar la madera temprana de la madera tardía.



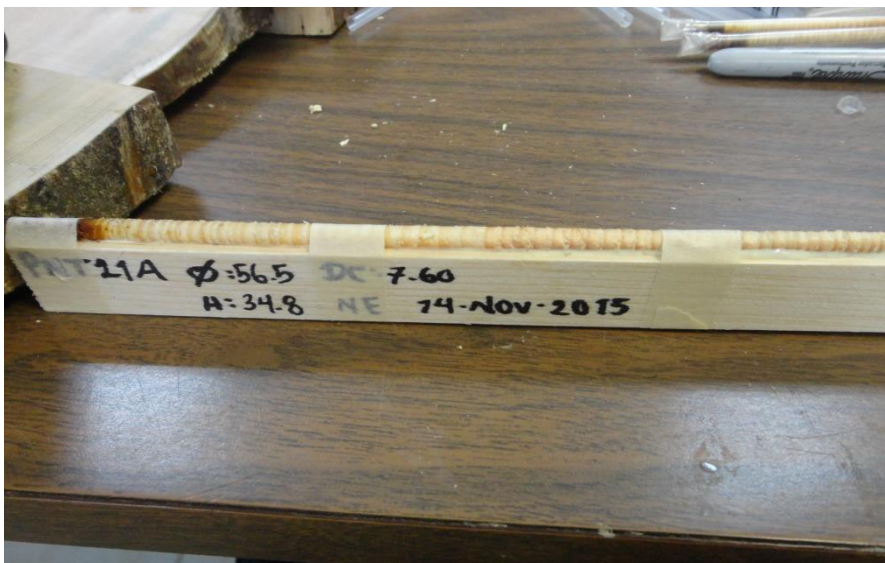


Figura 5. Muestra preparada bajo técnicas dendrocronológicas.

#### 6.1.4. Fechado y medición

Otra de las técnicas dendrocronológicas es el fechado y medición (Fig.6), para esto se realizó lo siguiente:

*Conteo preliminar de anillos de cada muestra;* en este paso se realizó el marcaje a lápiz de las decenas (un punto), cincuentenas (dos puntos) y centenas (tres puntos).



Figura 6. Conteo preliminar de los anillos

*Fechado y marcaje*; de cada muestra se marcaron las décadas, cincuentenas, centenas, microanillos, anillos falsos y anillos perdidos.

*Medición de anillos de crecimiento*; los anillos de crecimiento de cada viruta se contaron y fecharon con un estereoscopio trinocular de alta resolución. Después se midió el ancho de anillo total con un sistema de medición VELMEX de precisión 0.001 mm, con el programa de medición MeasureJ2X para Windows (Fig. 7).



Figura 7. Medición en el sistema de medición Velmex.



### 6.1.5. Control de calidad de fechado

Continuando el proceso de fechado y medición, las series de datos fueron sometidas a un control de calidad de fechado, la respuesta climática y la exactitud de la medición de cada anillo con el programa COFECHA, dicho programa es dependiente de la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL por sus siglas en inglés).

Este programa elabora un resumen de las estadísticas descriptivas del conjunto total de los datos. Con base en esto construye una serie maestra asignando valores medios a cada uno de los años representados en las series individuales e indica el número de árboles considerados anualmente (Villanueva-Díaz et al., 2010).

De igual manera revisa estadísticamente el fechado por serie correlacionando sucesivamente segmentos sobrepuestos o traslapados de 50 años de cada serie individual con la serie maestra desarrollada con las muestras sobrantes. Da indicaciones de segmentos pobremente correlacionados con la serie maestra que podrían representar posibles problemas de fechado y/o de medición en dichos segmento (Constante García *et al.*, 2009)

El programa COFECHA también indica las mediciones de anillos individuales considerados estadísticamente como “outliers” (datos que no nos sirven al compararse con la distribución de las mediciones de anillos en las diferentes series para el mismo año), es decir anillos excesivamente anchos o demasiado angostos (González-Elizondo, 2003).

### 6.1.6. Estandarización de los datos

Una vez realizadas las series de crecimiento por el programa COFECHA, se estandarizaron con el programa ARSTAN, este programa también es dependiente de la DPL, con esto se logra insertar los valores del ancho de anillo a una curva exponencial negativa o línea recta y dividir cada valor anual de medición, entre el valor estimado por la curva, este método permite generar una serie de índices normalizados la cual cuenta con media de 1 y una varianza homogénea. Dicha estandarización permite eliminar tendencias biológicas (competencia, supresión y liberación) y geométricas (aumento en el área del fuste con la edad) no relacionadas con el clima (Correa-Díaz *et al.*, 2014).

El programa generó tres tipos de cronologías, la cronología estándar, la cronología residual y la cronología ARSTAN (Fig.8), cada una de ellas difiere en el grado de ajuste (Constante-García, 2015).

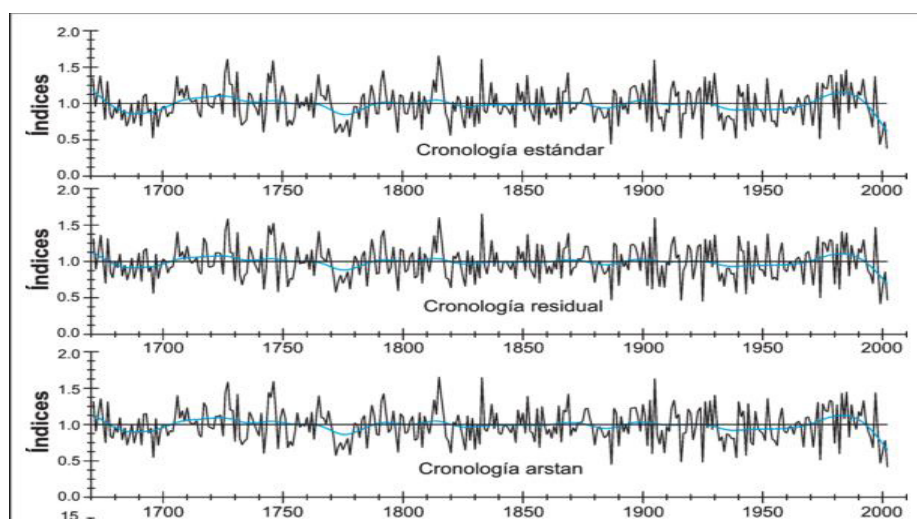


Figura 8. Cronologías generadas por ARSTAN.

Para este estudio, se utilizó la cronología estándar en las tres zonas, la cual fue la que se ajustó mejor a cada serie individual, la cronología estándar es una



curva que simula el crecimiento biológico y posteriormente es promediada estadísticamente.

#### **6.1.7. Obtención de registros de precipitación y temperatura**

Los registros de precipitación se obtuvieron del programa Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III), del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (IMTA, 2000), del que se seleccionaron estaciones cercanas a las áreas de estudio, para la zona de Coahuila, Durango y Nuevo León, y de esta manera integrar una base de datos de precipitación y temperatura media mensual a nivel regional. Las estaciones meteorológicas seleccionadas para el estado de Coahuila fueron: San Antonio de las Alazanas (SMN), San Antonio de las Alazanas (DGE), El Tunal, Jame y Saltillo Para el estado de Durango las estaciones fueron: La Peña, La Ciudad, El Salto 10093, El Salto 10025, Santa Bárbara 2 y Llano Grande. Y por último para el estado de Nuevo León se identificaron tres estaciones cercanas al área de estudio, siendo estas: Dieciocho de Marzo, Mimbres y Galeana.

#### **6.1.8. Correlación clima-crecimiento**

Los datos de las estaciones presentaron información de la precipitación y temperatura mensual del período 1984- 2002 para Coahuila, 1975-2001 para Nuevo León y para Durango el período 1964-2002. En estos periodos se realizó un análisis de correlación para detectar posibles fluctuaciones a las cuales estuviera expuesta la serie climática, y se omitieron datos que estuvieran cercanos al año 1920, que fue cuando se iniciaron las primeras estaciones climatológicas, y estas pudieran presentar sesgos en sus mediciones.

Para definir la influencia del clima sobre el crecimiento de *Pseudotsuga menziesii*, se corrió una función respuesta, utilizando análisis de correlación sobre los índices de ancho de anillo (IAA) y el promedio de precipitación y



temperatura para cada año durante el período de registros disponibles antes mencionados, de igual manera se correlacionaron los datos de IAA con los índices de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) y los índices de El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), para determinar la influencia sobre el crecimiento de la especie en estudio ya que estudios anteriores demuestran que estas correlaciones resultan de gran importancia paleoclimática para el norte de México, ya que la gran mayoría están altamente correlacionadas con la precipitación invierno-primavera y debido a este fenómeno se presentan inviernos húmedos con eventos cálidos de ENSO e inviernos secos durante su fase fría.

### 6.1.9 Reconstrucción climática

Para la generación del modelo climático que permita la reconstrucción total del período para cada zona fue necesario realizar un análisis de regresión con ajuste el cual es muy utilizado cuando se trabaja con dendrocronología.

La aplicación de un análisis de regresión sobre los Índices de Ancho de Anillo (IAA) de *Pseudotsuga menziesii* y las variables climáticas, generó una ecuación de tipo lineal para el periodo de 1975-2001 (CPOT), 1964-2002 (PNT) y 1984-2002 (SZAP).

En este modelo el IAA actúa como predictor de las variables climáticas en el tiempo, el modelo lineal generado fue el siguiente:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 * (X) + \varepsilon$$

Dónde:

$\gamma$  = Valor de la variable (precipitación o temperatura) reconstruida de un año en particular (mm).

$\beta_0$  = Coeficientes de la regresión (Intercepto).





$\beta_1$  = Coeficiente de la regresión (Pendiente).

$X$  = Índice del ancho de anillo total (variable independiente).

$\xi$  = error del modelo.

## 6.2. Elaboración del Modelo de Regresión

### 6.2.1. Correlación de las cronologías para El Norte -Noreste de México

Una vez elaboradas las cronologías para cada una de las zonas de estudio se realizó la correlación entre las cronologías por periodos de 50 años, y de esta manera determinar si existía correlación alguna entre las tres cronologías. Para de esta manera determinar a partir de qué periodo las correlaciones entre las cronologías se hacían más frecuentes.

Ya que se obtuvo la mayor correlación entre los periodos, a partir del mismo se definió la longitud de la cronología total, la cual parte de 1950 a 2014 (64 años).

### 6.2.2. Series del tiempo y Modelos ARIMA

Una vez obtenida la longitud de la cronología general, se utilizaron modelos de series de tiempo, para observar la tendencia de los valores, la estacionalidad y por último determinar los ciclos; que son caídas y crecimientos en periodos no fijos. Y de esta manera aplicar los modelos que mejor expliquen la variable, uno de los mayores inconvenientes es que el estudio de los datos observados nos permite extraer ciertas conclusiones, que se refieren solamente a los datos estudiados (cronología general de 64 años), en cierta parte nos sentimos tentados a hacer generalizaciones que vayan más allá de los datos manejados.



Para poder generalizar más allá de los datos manejados necesitamos “modelizar” y no solamente “describir” los datos, razón por la cual se aplicaron modelos ARIMA bajo la metodología de Box y Jenkins (1970), los procesos ARIMA se aplican a series estacionarias; esto es, a series de tiempo con media y varianza constantes.

Los datos utilizados fueron la base de datos generada por la cronología general para el Norte-Noreste de México, los datos se corrieron en el software estadístico Rproject versión 3.4.0. para utilizar la función “auto.arima” dicha función, interpreta los datos como serie del tiempo y realiza un proceso autorregresivo sobre la variable y nos arroja el mejor modelo para esa variable. El mejor modelo (con AICc menor) se selecciona entre los cuatro modelos siguientes:

1. ARIMA(2,d,2)
2. ARIMA(0,d,0),
3. ARIMA(1,d,0),
4. ARIMA(0,d,1).

Si  $d=0$  entonces la constante  $c$  es incluida; si  $d > 1$  entonces la constante  $c$  es próxima a cero, esto es llamado el “modelo actual” o “mejor modelo”.

La primera fase de la metodología de Box y Jenkins consiste en identificar el posible modelo ARIMA que sigue la serie, lo que requiere:

- Decidir qué transformaciones aplicar para convertir la serie observada en una serie estacionaria.
- Determinar un modelo ARMA para la serie estacionaria, es decir, los órdenes  $p$  y  $q$  de su estructura autorregresiva y de media móvil.

La segunda fase: Seleccionado provisionalmente un modelo para la serie estacionaria, se pasa a la segunda etapa de estimación, donde los parámetros AR y MA del modelo se estiman por máxima verosimilitud y se obtienen sus errores estándar y los residuos del modelo.





La tercera fase es el diagnóstico, donde se comprueba que los residuos no tienen estructura de dependencia y siguen un proceso de ruido blanco. Si los residuos muestran estructura se modifica el modelo para incorporarla y se repiten las etapas anteriores hasta obtener un modelo adecuado.

- La cuarta fase es la predicción, una vez que se ha obtenido un modelo adecuado se realizan predicciones con el mismo.

#### **6.2.2.1 Análisis de datos**

Obtención de Datos: Es conveniente tener 50 o más datos, y en el caso de series mensuales, trabajar entre seis y diez años completos.

Representación gráfica: Es de gran utilidad disponer de un gráfico de la serie para decidir sobre la estacionalidad.

Transformación previa de la serie: Cuando la serie no es estacionaria en varianza se requiere una transformación logarítmica. No obstante, la transformación logarítmica es muy frecuente incluso en series con dispersión relativamente constante en el tiempo, para el presente trabajo no fue necesario transformar la serie.

Eliminación de la tendencia: La observación del gráfico de la serie indica la existencia o no de tendencia.

Identificación del modelo: Consiste en determinar el tipo de modelo más adecuado, esto es, el orden de los procesos autorregresivos y de medias móviles de las componentes regular y estacional.

Técnicamente esta decisión se toma con base en las funciones de autocorrelación (AC) y autocorrelación parcial (PAC), tanto en la parte regular como estacional.



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Obtención de Cronologías

Las cronologías desarrolladas para cada una de las zonas comprenden periodos de edad que van desde los 127 años hasta 135 años. El periodo más corto en edad corresponde a la cronología de la Sierra de Zapalinamé, la cronología del Cerro El Potosí es ligeramente más amplia (128 años) y el periodo de edad más largo (135 años) corresponde a la cronología de Puenteillas.

Las correlaciones internas de las tres cronologías fueron positivas, para CPOT se obtuvo un valor de .72, este resultado con base en estudios realizados en diversas partes del norte y noreste de México, el valor promedio que presenta la especie en estudio es de 0.75 (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010; Canizales, P., 2011), este resultado se muestra satisfactorio en relación a los valores promedio obtenidos en los estudios por los autores mencionados.

Para el área de SZAP se obtuvo una intercorrelación de .70, resultado similar a los obtenidos por (Villanueva-Díaz, *et al.*, 2009), (Constante G. Vicenta *et al.*, 2009) donde obtuvieron una intercorrelación entre series de .710 y .720 para *Pseudotsuga menziesii* en SZAP.

Para la zona de PNT, se obtuvo una intercorrelación entre series de .567 este resultado está por debajo a los obtenidos por (Cerano-Paredes *et al.*, 2012), donde obtuvo una intercorrelación entre series de .706, por otro lado, la intercorrelación es aceptable ya que uno de los criterios utilizados en dendrocronología es que la intercorrelación sea mayor a .381, con un nivel de confianza del 95%, y para el objetivo de este trabajo es satisfactorio el resultado.

Se obtuvo una longitud media en edad que va de los 63.5 a 67.7 años, el que la longitud media de la edad sea menor de cien años nos muestra que las



poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* en las áreas de estudio son una población joven ya que no se detectaron muchos individuos con edad mayor a 100 años, en trabajos similares se obtuvo una longitud media en edad de 82.2 años.

Con base en la sensibilidad media, parámetro indicativo que determina la diferencia relativa en anchura o grosor de un anillo con relación al próximo; es decir, el cambio porcentual en grosor de un anillo al siguiente. Este valor fluctúa de 0 a 2, donde el valor de 0 indica que no existe diferencia en grosor de un anillo al siguiente y un valor de 2 significa que un anillo de los dos comparados en una secuencia de serie de tiempo tiene un crecimiento nulo (Villanueva Díaz *et al.*, 2008), para CPOT, PNT y SZAP se obtuvieron valores de 0.533, 0.195 y 0.211 respectivamente, los cuales estuvieron en los rangos de sensibilidad media obtenidos para la Sierra Madre Oriental (0.23-0.38), Sierra Madre Occidental (0.13-0.34), CPOT fue el único que estuvo por encima ligeramente con los valores reportados para la sierra Madre Oriental, este valor indica que la respuesta climática de la especie depende más de las condiciones del sitio donde se desarrolla, que de las condiciones climáticas de la región (Tabla 1).

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de las cronologías regionales generadas por el programa ARSTAN para el Norte-Noreste de México.

Estadísticos	CPO	SZA	PNT
	Estándar	Estándar	Estándar
Mean	3.083	1.821	1.895
Median	2.804	1.833	1.933
Sensitividad media	0.533	0.211	0.195
Desviación estándar	1.786	0.502	0.313
1Asimetría (Skewness)	0.808	-0.36	-0.494
2Kurtosis	0.344	0.227	0.572
3Autocorrelación de 1er Orden	0.26	0.57	0.7
Autocorrelación de 2do Orden	0.34	0.32	0.08
Autocorrelación de 3er Orden	0.11	0.06	0.1

## 7.2 Relación Clima-Crecimiento

En las áreas de estudio se determinó que el periodo de lluvia que influye de manera significativa ( $p < 0,05$ ) en el crecimiento de la especie, es el periodo invierno-primavera de enero a mayo específicamente, lo que nos muestra que la especie depende de la precipitación que se presenta en la época fría del año. Este período se caracteriza por presentar una baja intensidad de lluvia generando así una infiltración alta y una baja evapotranspiración, en las áreas de estudio la precipitación del periodo invierno - primavera constituye alrededor de un 50% del total anual (Fig. 9)

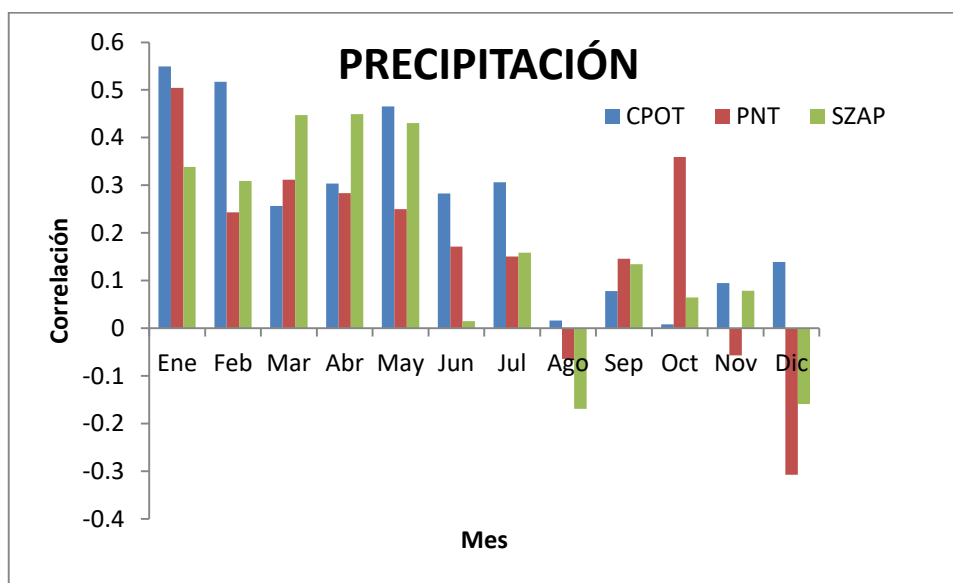


Figura 9. Correlación entre el índice de ancho de anillo de y la precipitación acumulada mensual para el Norte-Noreste de México)

Una respuesta de las coníferas a la precipitación invierno - primavera, se ha descrito con anterioridad para la Sierra de Arteaga y para el Cerro El Potosí (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007), y para La Cuenca del río El Presidio (Díaz-Rámirez *et al.*, 2016).

### 7.3 Reconstrucción del clima.

La correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos indicaron un valor de 0.79 para CPOT, 0.89p para SZAP y 0.85 para PNT ( $p < 0.001$ ), estos resultados muestran una alta asociación entre ambas variables, estadísticamente, es válido con fines de reconstrucción (Fig. 10, 11 y 12).

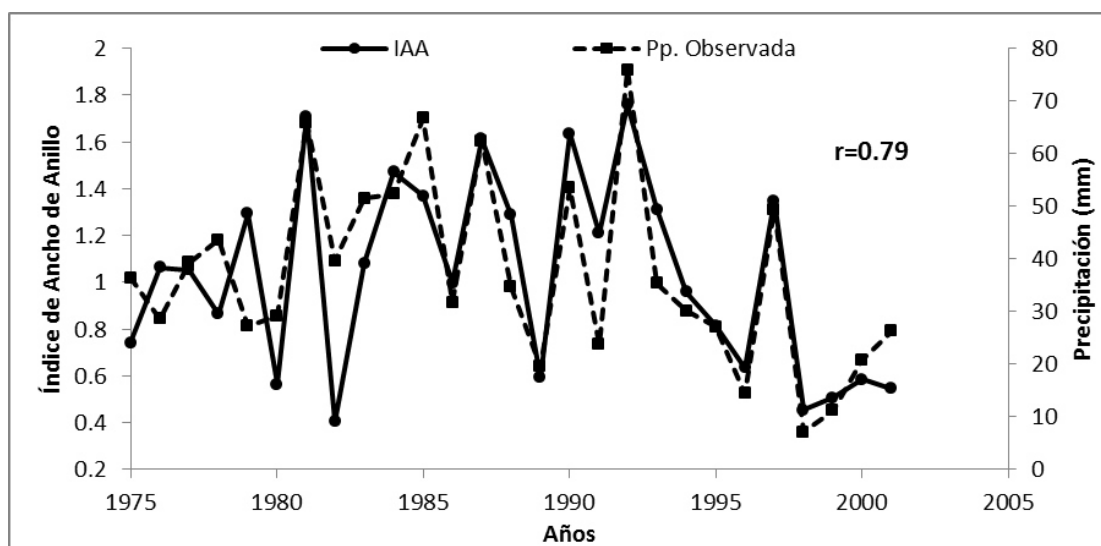


Figura 10 .correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos, Cerro El Potosí

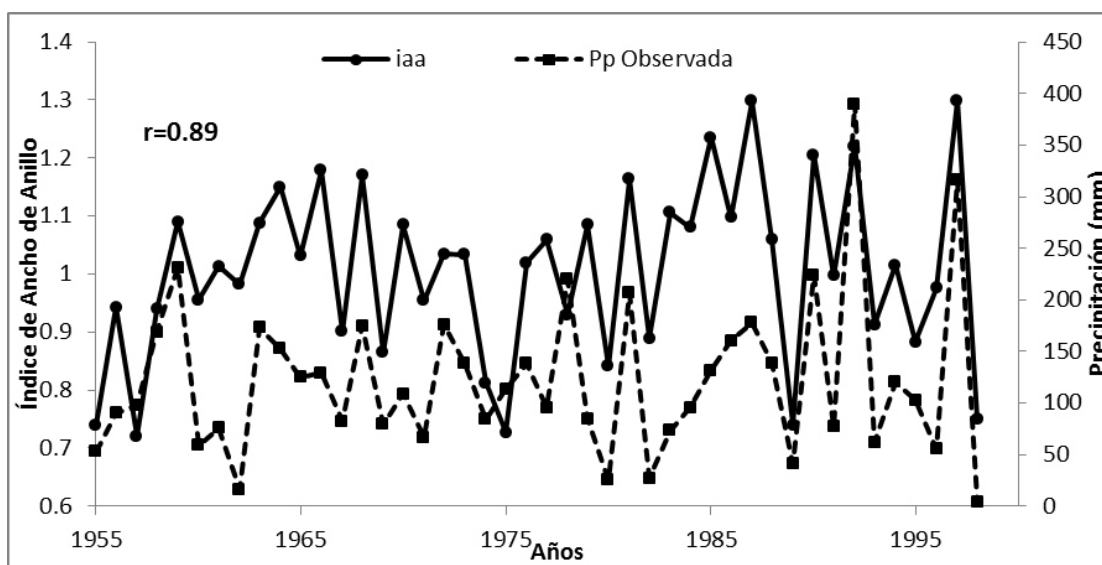


Figura 11. Correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos Sierra de Zapalinamé.

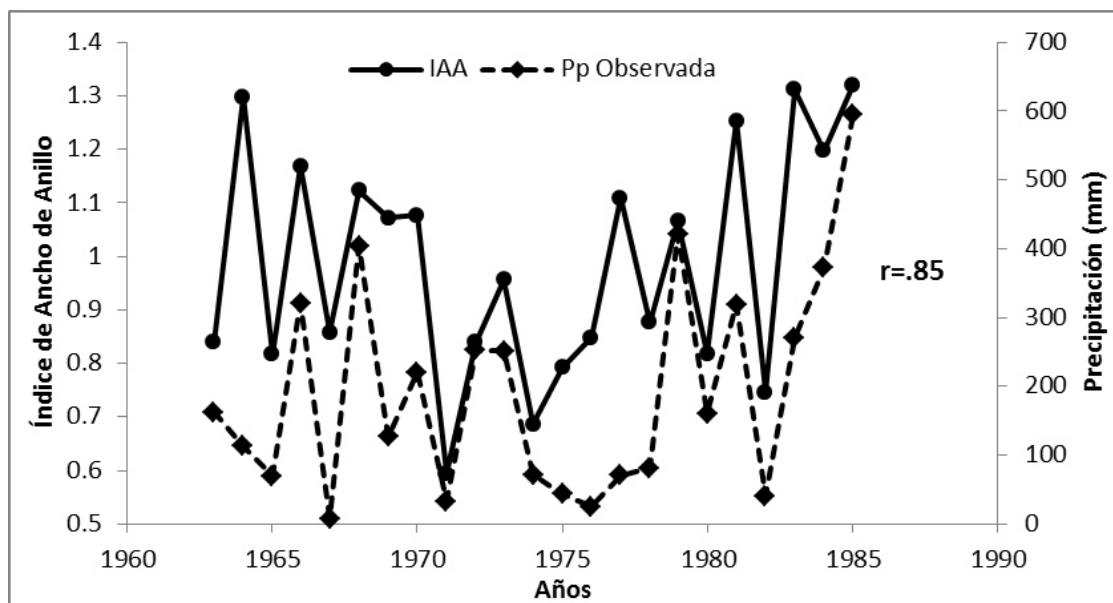


Figura 12. Correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos, Puente de Cillas.

## 7.4 Reconstrucción del periodo total y detección de periodos secos y húmedos.

Los modelos de regresión lineal para fines de reconstrucción se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Modelos Lineales generados, para cada zona.

ÁREA DE ESTUDIO	MODELO LINEAL
Cerro El Potosí	$Y = 12.9081 + 167.5721 * X$
Puentecillas	$Y = 0 + 209.2771 * X$
Sierra de Zapalinamé	$Y = -2195.1600 + 2362.7488 * X$

Al determinar el modelo se generó la reconstrucción, en la extensión total de la cronología para CPOT corresponde el período de 1888-2015 (Fig.13 ) para un total de 128 años, en donde se identificaron siete periodos de sequía importantes, los cuales corresponden de 1896-1903, 1908-1911, 1919-1933, 1945-1964, 1973-1978, 1995-2003 y del 2007-2014, estos resultados son

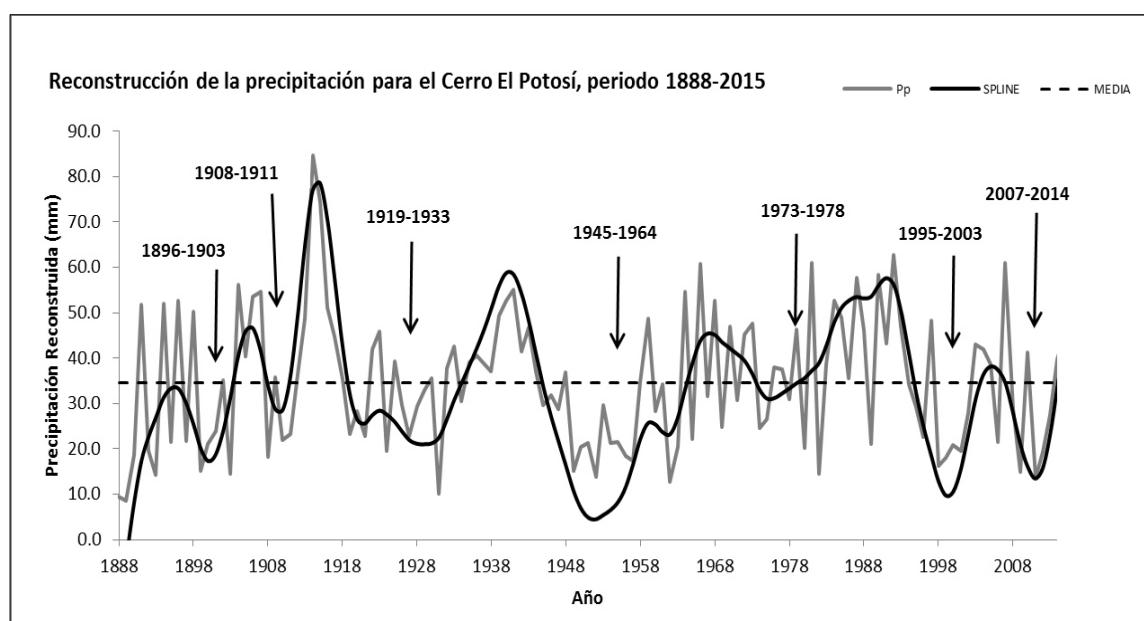


Figura 13. Reconstrucción total para el Cerro El Potosí 1888-2015.

similares a los encontrados por (Arreola-ortiz & González-elizondo, 2010) (Canizales, 2011), el periodo comprendido de 1945 a 1964 fue una de las sequias más intensas que se presentó en el Norte y Centro del país.

En lo que respecta a PNT la cronología (Fig. 14) se reconstruyó para un periodo de 1880-2014 para un total de 135 años.

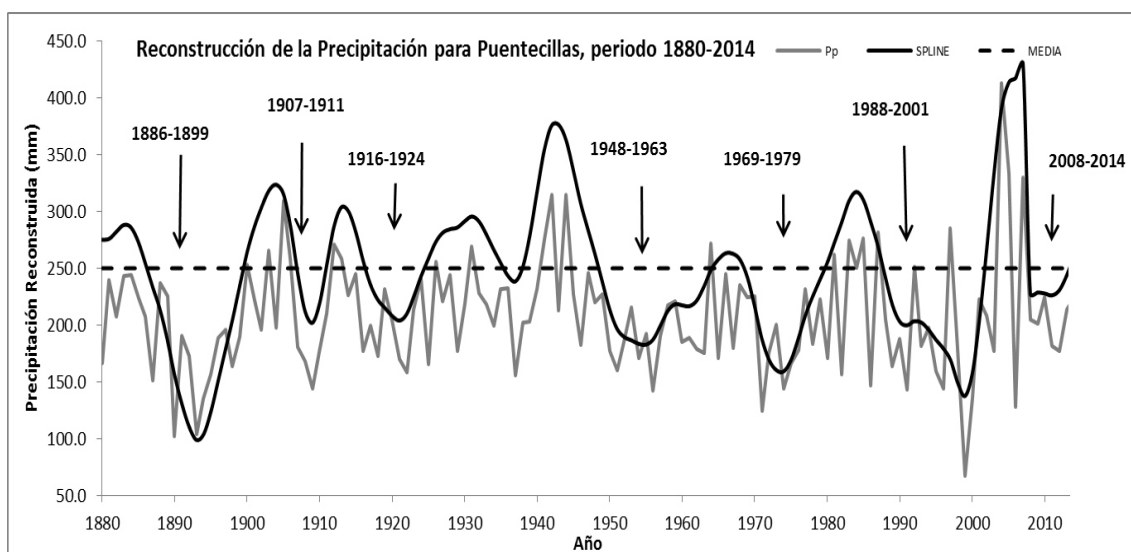


Figura 14. Reconstrucción de la precipitación Puentecillas, 1880-2014.

Al igual que CPOT se encontraron siete periodos de sequía de 1886-1899, 1907-1911, 1916-1924, 1948-1963, 1969-1979, 1988-2001 y de 2008 a 2014, estos periodos coinciden con un trabajo realizado por (Díaz-Rámirez *et al.*, 2016) donde hizo una reconstrucción de la precipitación para la región hidrológica Presidio-San Pedro.



Por último para SZAP se reconstruyó un período de 1889-2015 (Fig. 15), que se extiende a una longitud de 127 años, en donde coinciden los periodos con las dos zonas anteriores, los que corresponden de 1900 a 1903, 1908-1919, 1926-1933, 1948-1960, 1970-1980, 1994-2000 y del 2008 al 2014, estos mismos resultados son los presentados por (Villanueva Díaz *et al.*, 2011), en donde menciona que una de las más importantes sequías fue la sequía del período 1950–1965 fue la más intensa del siglo XX y causó severos daños socioeconómicos, no sólo a la población de Durango, sino también a diversos asentamientos humanos del norte y centro del país.

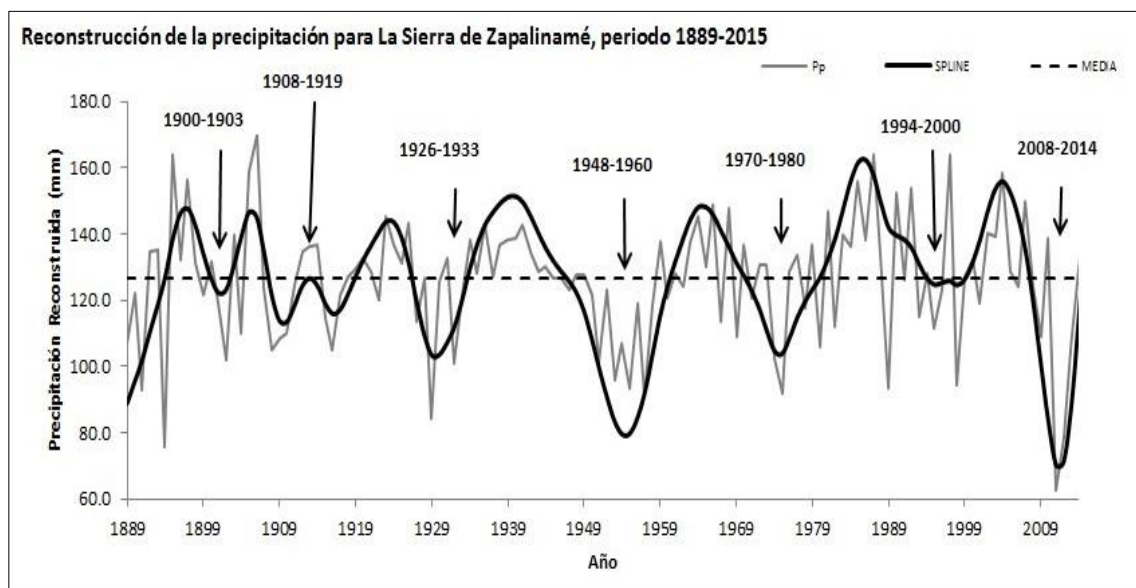


Figura 15.Reconstrucción de la precipitación Sierra de Zapalinamé, 1889-2015.

## 7.5 Correlación entre cronologías

La correlación entre las cronologías se realizó por periodos cada 50 años a partir de la cronología más longeva (PNT 1880-2014), la correlación más alta se logró a partir del año 1950 a 2014, que fue en el periodo donde se encontraron correlaciones positivas que variaron de 0.51 a 0.74 (Fig.16).

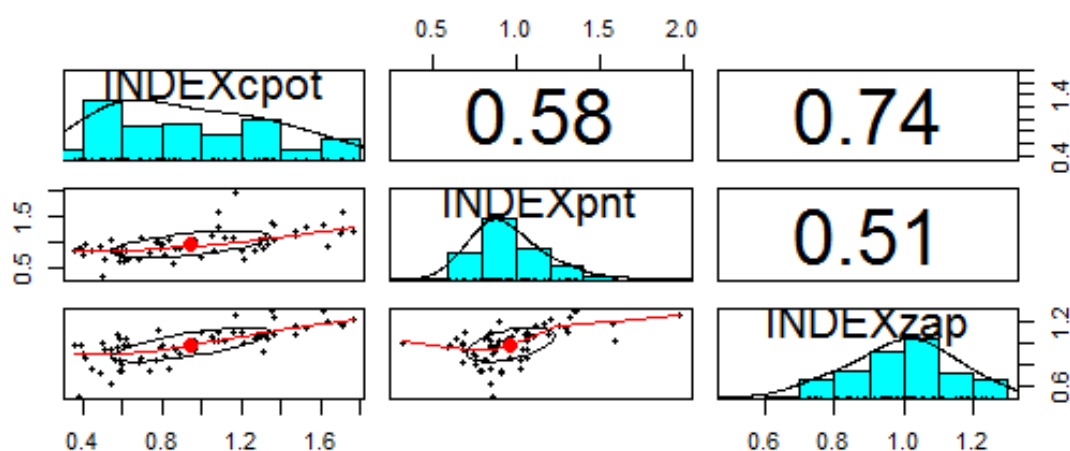


Figura 16. Correlación entre cronologías.

Una vez realizada la correlación, se promediaron los valores del índice de ancho de anillo de las tres cronologías para así generalizar los periodos de sequía y humedad para la parte Norte-Noreste del país (Fig. 17).

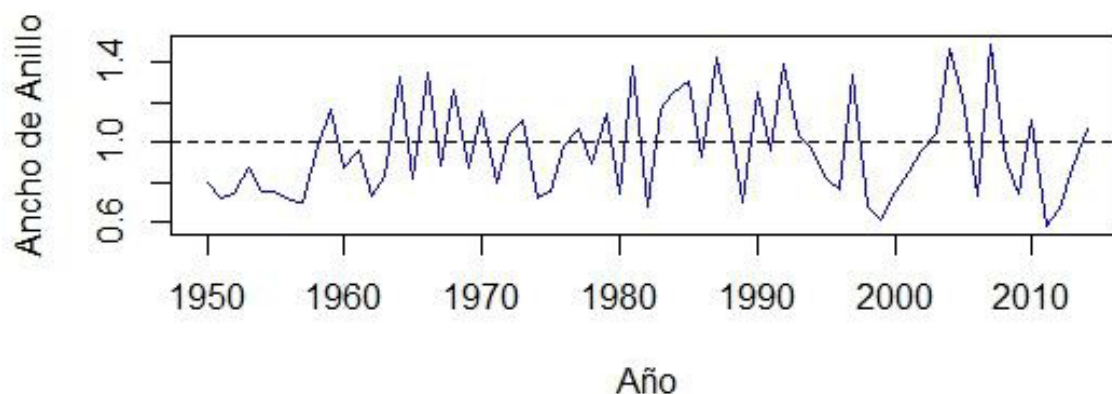


Figura 17. Cronología general para el Norte-Noreste de México.

Generada la cronología del Norte-Noreste, se correlacionaron con los datos de ENOS y PDO, para entender cómo influye la presencia de estos fenómenos climáticos, en el desarrollo de la especie, ya que estos son eventos que ocurren a nivel global, obteniendo resultados positivos que variaron de .41 a .44, en la figura 18, se puede observar que el ritmo de crecimiento de la cronología está relacionada con PDO durante los primeros 60 años (1890-1950). Esto es más notorio para el periodo de 1900-1920. Posterior a 1950 se observan ritmos de crecimiento similares entre la cronología con los eventos, de acuerdo con el Panel intergubernamental de cambio climático (IPCC, 2012) a partir del 1960 los eventos a nivel mundial se ven más relacionados con el crecimiento de las masas forestales a nivel local .

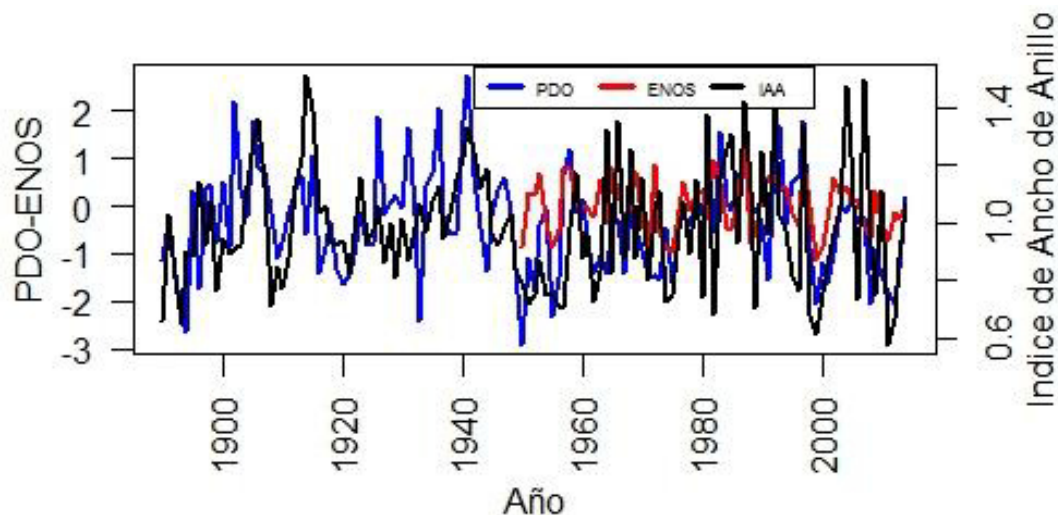


Figura 18. Correlación ENOS-PDO-Cronología general

## 7.6. Aplicación del Modelo ARIMA

Los datos analizados fueron en total 64 años, al momento de graficar los datos, la serie mostró una tendencia estacionaria, por lo cual no fue necesario transformar la serie (Fig.19).

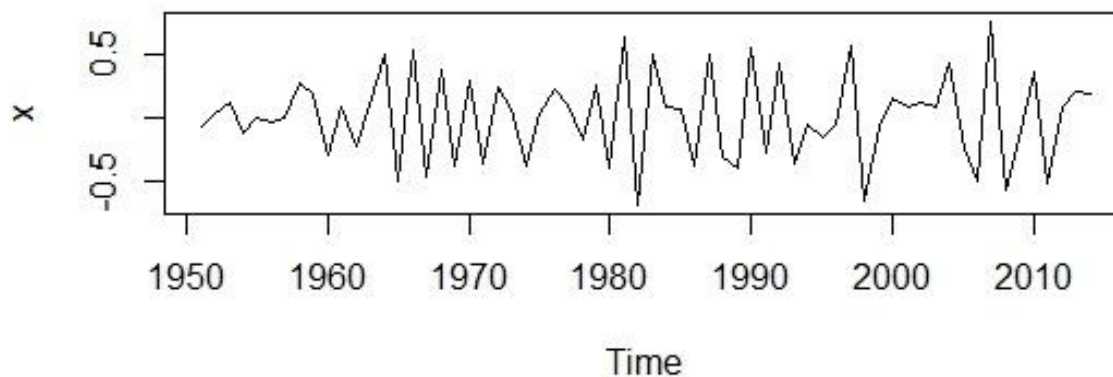


Figura 19. Tendencia de la cronología general 1950-2014

De la cronología general se utilizaron todos los datos ya que para realizar el modelo es necesario contar con un mínimo de 50 datos, la identificación del modelo consistió en determinar el tipo de modelo más adecuado, esto es, el

orden de los procesos autorregresivos y de medias móviles de los componentes.

Esta decisión se toma con base en las funciones de autocorrelación (AC) y autocorrelación parcial (PAC) los cuales mostraron resultados muy similares (Fig.20), esto nos indica que tanto la parte estacionaria como no, resultaron ser significativas.

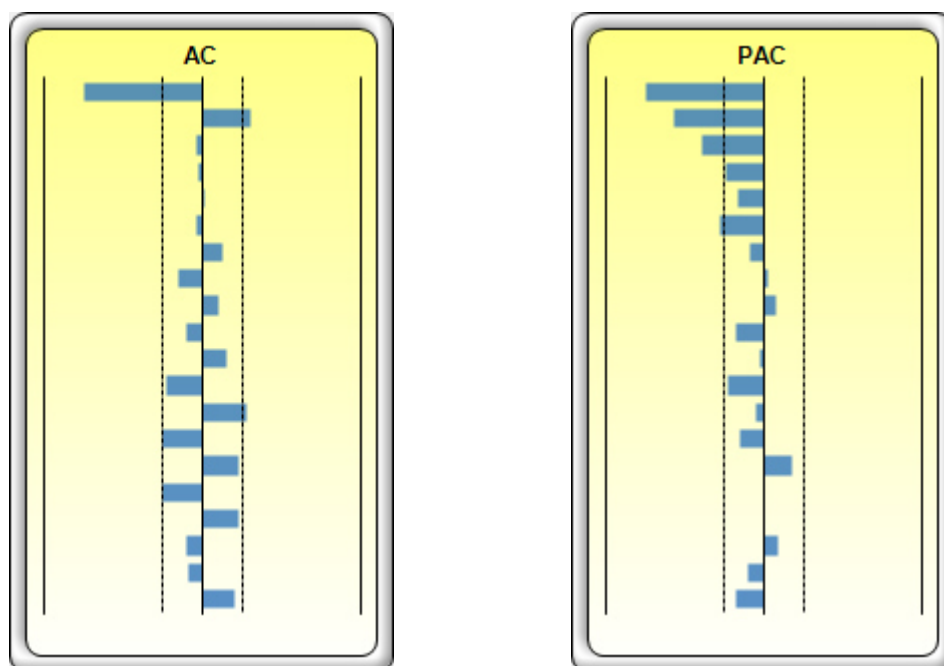


Figura 20. Autocorrelación (AC) y Autocorrelación Parcial (PAC) del modelo.

El modelo que mejor se ajustó a los datos fue el modelo ARIMA número 1 ( $p=0$ ,  $d=2$ ,  $q=2$ ), en el cual se obtuvieron resultados estadísticamente significativos, (Tabla 3), con un R cuadrado de .79, lo cual indica que la variable se encuentra explicada en un 79%, por las variables independientes. El criterio de información de Akaike y el criterio de Schwarz, se usan para elegir el mejor modelo, en este caso, entre más bajo sea mejor es el modelo, como se puede observar no son las más bajos, sin embargo, el criterio utilizado para la elección del modelo nos dice que se obtuvo el R cuadrado ajustado más alto, de ahí la elección del

modelo número uno, la prueba de Durbin-Watson, midió la correlación serial de los residuos, si es menor a dos implica que la correlación es positiva.

Tabla 3. Modelos generados por el método Auto-Arima.

AUTO-ARIMA (Modelos Autorregresivos Integrados de Medias Móviles)						
Modelo	R Cuadrado	Criterio de Información	Criterio de	Estadístico (DW)	Número de	Modelo
ARIMA	Ajustado	Akaike (AIC)	Schwarz (SC)	Durbin-Watson	Iteraciones	Número
<b>P=0, D=2, Q=2</b>	<b>0.7999</b>	<b>0.2377</b>	<b>0.4350</b>	<b>2.2634</b>	<b>23</b>	<b>1</b>
P=2, D=2, Q=0	0.6897	0.6993	0.9015	2.4171	0	2
P=0, D=1, Q=1	0.4925	0.0021	0.1320	2.1802	11	3
P=1, D=1, Q=1	0.4858	0.0131	0.2104	1.9496	20	4
P=2, D=1, Q=1	0.4856	0.0121	0.2784	2.0210	16	5
P=2, D=1, Q=0	0.4404	0.1135	0.3132	2.0779	0	6
P=1, D=1, Q=0	0.3714	0.2272	0.3587	2.4107	0	7
P=2, D=0, Q=1	0.0192	-0.0985	0.1645	1.9871	30	8
P=0, D=0, Q=2	0.0172	-0.0847	0.1080	1.9295	11	9
P=2, D=0, Q=0	0.0121	-0.0749	0.1224	2.0605	0	10
P=0, D=2, Q=0	0.0000	1.8536	1.9193	3.4877	0	11
P=0, D=1, Q=0	0.0000	0.6964	0.7614	3.2265	0	12
P=1, D=0, Q=0	-0.0152	-0.0306	0.0994	1.9916	0	13
P=0, D=0, Q=1	-0.0152	-0.0370	0.0914	1.9983	15	14

Los estadísticos de la regresión (Tabla 4) muestran que el coeficiente de correlación que se obtuvo es de .89 el cual es un valor altamente positivo, ya que este valor mide la correlación que existe entre la variable real y la variable estimada.

Tabla 4. Estadísticos de la regresión.

Estadísticas de la Regresión			
R-Cuadrado	0.8064	Criterio de Información Akaike (AIC)	0.2377
R-Cuadrado Ajustado	0.7999	Criterio Schwarz (SC)	0.4350
Coeficiente de correlación	0.8980	Logaritmo de Probabilidad	-7.49
Error Estándar Estimado (EEy*)	0.63	Estadístico Durbin-Watson (DW)	2.2634
Número de Observaciones	63	Número de Iteraciones	23

El Análisis de Varianza muestra que el modelo es estadísticamente significativo, ya que la prueba con el estadístico F, (Tabla 5) apoyado en los resúmenes generales es altamente mayor al valor de P proporcionado por el modelo.

Tabla 5. Análisis de varianza.

Análisis de Varianza				
	Suma de Cuadrados	Suma del Promedio de Cuadrados	Estadístico F	Valor P
Regresión	19.56	9.78	124.95	0.0000
Residual	4.7	0.08		
Total	24.26			

Otro de los criterios utilizados al trabajar con modelos ARIMA, es que al momento de estar generando la gráfica, los datos proyectados deben seguir una tendencia creciente, esto es, que la proyección de los datos sea positiva, al menos en el periodo próximo de los datos, como se puede observar en la figura 21, la tendencia de nuestros datos van hacia arriba, lo cual supone que el modelo generado es el adecuado.

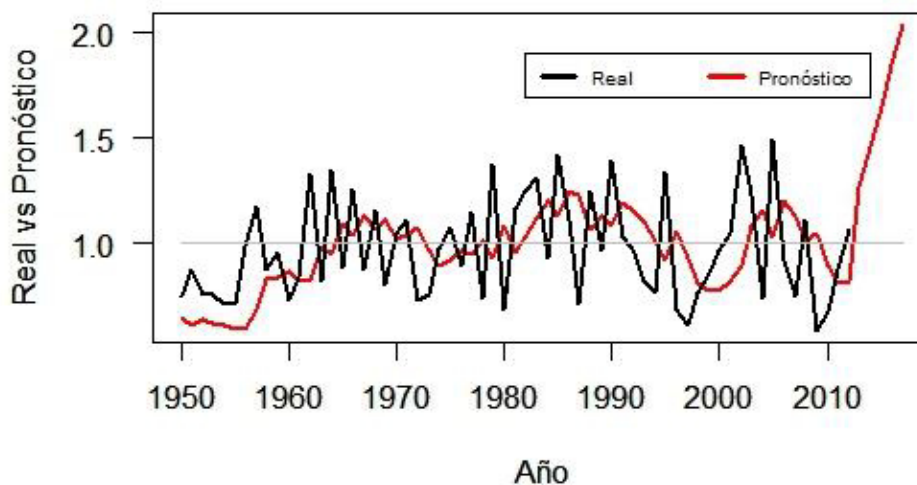


Figura 21. Gráfica generada donde se observa la tendencia positiva de la predicción de los valores futuros.



## 7.7 Modelo de Regresión segmentado

Obtenidos los valores de cada uno de los modelos (Tabla 6), tanto el lineal para el periodo 1880-1950, como el de predicción para el periodo 1950-2014, se realizó la unión de ambos.

Tabla 6. Coeficientes del modelo lineal y del modelo Arima.

Coeficientes del Modelo de Regresión Segmentada				
Modelo	b0	b1	b2	e
ML	0.0003	0.98336817		0.15
ARIMA	0.0004	-1.6551	0.6898	0.6300

Basándonos en el método de Muggeo (2003), propuesto por (González-Carro, 2016) donde el modelo de regresión segmentada se escribe de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta \psi (X - \psi)^+ + \varepsilon$$

Donde Y es igual al crecimiento de la especie, y donde  $(X - \psi)^+ = (X - \psi)I(X > \psi)$ , siendo  $I(\cdot)$  la función indicadora. Por lo anterior,  $\beta_1$  es la pendiente del modelo cuando  $X \leq \psi$  y  $\beta_1 + \beta$  es la pendiente cuando  $X > \psi$ . Dicho de otra forma  $\beta$  es la diferencia que existe entre la primera y la segunda pendiente.

El modelo generado es el siguiente:

$$Y = 0.00 + 0.9833(x) + 0.6717(x) - 0.6494 + \varepsilon$$

Al correr el modelo en R los valores que arroja fueron positivos con un valor de R de .92 (Fig. 22)



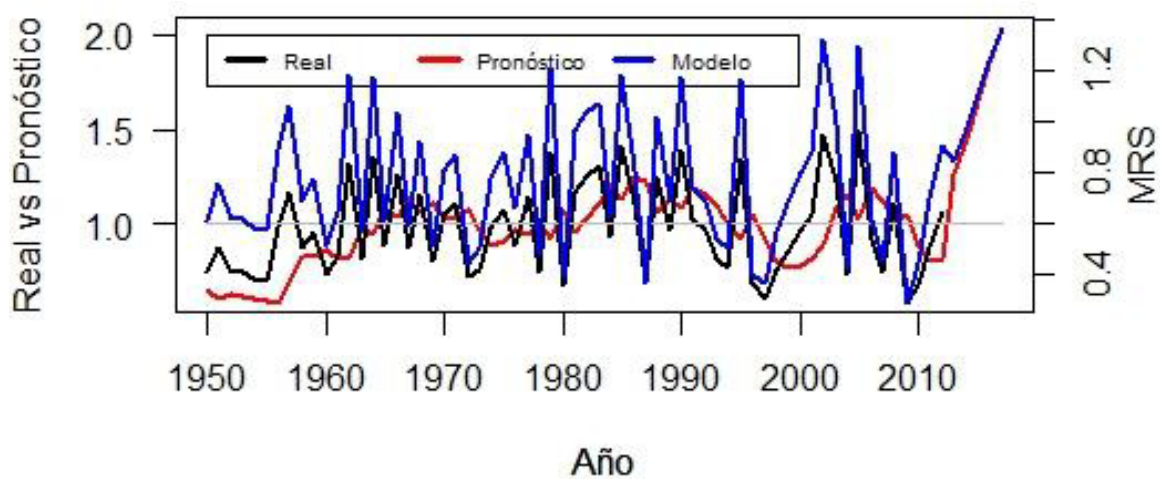


Figura 22. Gráfica donde se observa la tendencia del modelo con respecto al valor real y al pronosticado.



## 8 CONCLUSIONES

El crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* respondió a la precipitación estacional invierno primavera (enero – mayo, específicamente), lo que implica que patrones de circulación que afectan el clima en este período del año, tienen una fuerte influencia en el desarrollo de la especie.

Los períodos secos y húmedos reconstruidos en el presente estudio han sido observados en otros trabajos en diferentes áreas de estudio, por lo tanto los datos aquí presentados son validados paleo climáticamente, ya que corrobora que los fenómenos atmosféricos que generan estos eventos se extendieron en grandes superficies del país.

La correlación con los fenómenos atmosféricos ENOS y PDO muestran una correlación significativa presentando valores de .40 y .41, la cual se hace más notoria a partir del periodo 1960 a la fecha.

La aplicación de esta metodología en el Norte-Noreste de México proporciona información sobre la evolución del crecimiento de la especie y nos da una idea sobre cómo se comportara a futuro la variable en estudio. Así, el uso de modelos ARIMA, se puede utilizar como una herramienta especialmente útil en un contexto en el que no existe información estadística ni control sobre la variable.

Con respecto al modelo, el simple hecho de plantearlo sin saber a ciencia cierta si realmente es correcto, en ocasiones, suele ser arriesgado, por lo anterior la regresión segmentada permite cuantificar de manera simple (a través de un parámetro) el crecimiento de una variable respecto a la otra.



## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Arreola-ortiz, M. R., & González-elizondo, M. (2010). Dendrocronología de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, México. Dendrochronology of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco from Sierra Madre Oriental in Nuevo León, México, 16(1), 71–84.
- Ávila Flores, D. Y., González Tagle, M. A., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., & Vargas Larreta, B. (2014). Dendrocronopirología: análisis de la evidencia morfológica de incendios forestales. Dendrochronopyrology : analysis of the morphological evidence of forest fires. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21), 136–147.
- Canizales Velázquez Pamela A. (2011). ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO Y ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO COMO INDICADORES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, CERRO EL POTOSÍ, MÉXICO.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., David Valdez Cepeda, R., Constante García, V., Luis González Barrios, J., & Estrada Ávalos, J. (2012). PRECIPITACIÓN RECONSTRUIDA PARA LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NAZAS, DURANGO RECONSTRUCTED PRECIPITATION FOR THE UPPER NAZAS RIVER BASIN, DURANGO. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(núm. 10), 1–17. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n10/v3n10a2.pdf>
- Constante G. Vicenta, José, V. D., Cerano P. Julián, H., C. O. E., & Salvador, V. M. (2009). DENDROCRONOLOGÍA DE *Pinus cembroides* Zucc. Y RECONSTRUCCIÓN DE PRECIPITACIÓN ESTACIONAL PARA EL SURESTE DE COAHUILA. *Rev. Ciencia Forestal En México.*, 34(106), 17–39.
- Constante-García, V. (2015). APLICACIÓN DE TÉCNICAS DENDROCRONOLÓGICAS EN *Pinus pseudostrobus* Lindl. Y *Quercus canbyi* Trel. PARA ANALIZAR LA INFLUENCIA CLIMÁTICA Y EL CAMBIO DE USO DE SUELO.
- Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., I., C.-E. U., Tomás, M.-T., & Cervantes-Mártinez, R. (2014). ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO DE AHUEHUETE (*Taodium mucronatum* Ten.) EN EL CENTRO DE MÉXICO. *Agrociencia*, 48(Núm. 5), 537–551.
- Díaz-Rámirez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera Y Bosques*, 22(Núm.1), 111–123.
- Dolgova, E. (2016). June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data. *Dendrochronologia*, 39, 17–23. <http://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.03.002>
- Encina-Domínguez, J. A., Zárate-Lupercio, A., Valdes-Reyna, J., & Villarreal-Quintanilla, J. A. (2007). CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA Y DIVERSIDAD DE LOS BOSQUES DE ENCINO DE LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA, MÉXICO. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*,



81, 51–63.

- García-Arévalo, A. (2008). Vegetación y flora de un bosque relictual de *Picea*, Chihuahua del Norte de México. *Polibotánica*, 25, 45–68. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n25/n25a5.pdf>
- González Carro, V. (2016). *REGRESIÓN SEGMENTADA*. Retrieved from [http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto\\_1461.pdf](http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_1461.pdf)
- González-Elizondo, M. (2003). *INDICADORES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ALGUNAS ESPECIES DE PINACEAS DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MEXICO*.
- IPCC. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. *Ipcc*. <http://doi.org/10.1596/978-0-8213-8845-7>
- Pajuelo, J. G., & Lorenzo, J. M. (1995). Análisis y predicción de la pesquería demersal de las islas Canarias mediante un modelo ARIMA. *Scientia Marina*, 59(2), 155–164.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Constante García, V., Stahle, D. W., Estrada Ávalos, J., & Tostado Plascencia, M. (2011). *Variabilidad hidroclimática histórica del norte de México inferida con anillos de crecimiento de douglas-fir\* douglas-fir's historical hydroclimatic variability in northern Mexico inferred with growth rings*.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Stahle, D. W., Estrada Ávalos, J., & Constante García, V. (2008). *POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO DE Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco Y RECONSTRUCCIONES DE PRECIPITACIÓN Y FLUJO EN MÉXICO. Folleto científico 23*. GómezPalacio, Durango. Retrieved from [http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3421/2905/potencial\\_dendrocronologico.pdf?sequence=1](http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3421/2905/potencial_dendrocronologico.pdf?sequence=1)
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Constante-García, V., Fulé, Z. P., & Cornejo-Oviedo, E. (2009). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera Y Bosques*, 15(3), 45–64.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Constante-García, V., Vázquez-Salem, L., Estrada-Ávalos, J., & Benavides-Solorio, J. de D. (2010). Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 7–29.
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., ... Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83, 117–131. <http://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>